

## Potenciais Efeitos dos Cenários Futuros do Clima na Aptidão Agroclimática da Cana-de-Açúcar no Estado do Tocantins

Erich Collicchio<sup>1</sup>; Humberto Ribeiro da Rocha<sup>2</sup>; Daniel de Castro Victoria<sup>3</sup>; André de Moura Andrade<sup>4</sup>; André Marcondes Andrade Toledo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Professor Associado II da Universidade Federal do Tocantins – UFT; <sup>2</sup>Professor do Departamento de Ciências Atmosféricas/IAG/Universidade de São Paulo; <sup>3</sup>Pesquisador da Embrapa Agricultura Digital; <sup>4</sup>Engenheiro Ambiental, Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Tocantins – SEMARH; e <sup>5</sup>Professor da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

### 1 - Introdução

Uma conjunção de fatores importantes como, a grande volatilidade dos preços do petróleo observada nas últimas décadas (MÁRTIL, 2016), associada às estimativas de declínio das reservas mundiais e à instabilidade política nas regiões produtoras (BRASIL, 2006; JANDREY *et al.*, 2010; MACHADO, 2016), bem como a preocupação global com as mudanças climáticas (IPCC, 2007; IPCC, 2013), provocadas especialmente pela queima de combustíveis fósseis e a mudança do uso da terra (RODRIGUES FILHO; JULIANI, 2013), instigou muitos países a buscarem formas alternativas de energia limpa na matriz energética mundial.

Estes fatores, com destaque aos compromissos assumidos pelos países signatários do Acordo de Paris durante a COP 21, pela necessidade da redução da emissões de gases de efeito estufa – GEE (UNFCCC, 2015), têm contribuído fortemente para a promoção do aumento da demanda mundial por biocombustíveis, notadamente o etanol proveniente da cana-de-açúcar (MARTINELLI; FILOSO, 2008; NARDY; GURGEL, 2013), o qual apresenta grandes vantagens comparativas em termos econômicos e ambientais sobre o etanol de milho e de cereais (JANK; RODRIGUES, 2007). De acordo ainda com esses autores, quando comparadas às matérias-primas para produção de etanol substituindo a gasolina, considerando-se a produtividade, o balanço energético e as emissões evitadas de GEE, o etanol proveniente da cana-de-açúcar supera em todos os itens, o do milho (Estados Unidos) e da beterraba (Comunidade Européia).

De acordo com Martinelli; Filoso (2008) o Brasil apresenta várias vantagens quanto a produção de etanol devido ao seu território agricultável e expansivo, condições hídricas e climáticas favoráveis.

Destaca-se ainda, que o Brasil possui uma experiência acumulada de mais de 30 anos em investimentos em pesquisa e na melhoria da produção de etanol da cana-de-açúcar (MARTINELLI; FILOSO, 2008). Além disso, a indústria brasileira lançou em 2003 no mercado nacional, a tecnologia flex, para automóveis e comerciais leves (JANK; RODRIGUES, 2007), sendo que nos últimos 16 anos esta tecnologia está presente em quase 90% dos automóveis leves novos vendidos no Brasil, além de ser o primeiro país a adicionar álcool anidro à gasolina.

O setor sucroenergético apresenta importância estratégica para o Brasil, pois possui cerca de 380 unidades produtoras e mais de 1.000 municípios com atividades vinculadas à indústria deste setor, distribuídas por várias regiões do País. Este setor gera mais de 950 mil empregos formais diretos no setor produtivo e apresenta cerca de 70 mil produtores rurais de cana-de-açúcar independentes, contribuindo ao equivalente a 2% do PIB brasileiro (UNICA; CEISE, 2016).

Impulsionado por estes fatos, no período de 2003 a 2009, observou-se que a área colhida brasileira apresentou um incremento de 2,04 milhões de hectares, o equivalente a um acréscimo de 38% da área produtiva total da cana-de-açúcar. Nesse mesmo período, a produção da cultura aumentou 55%, passando de 389,85 para 604,53 milhões de t (CONAB, 2017). Quando comparado o ano de 2020 em relação a 2009, percebe-se que houve um aumento de apenas 6,3 % na produção total, a qual desde 2014 encontra-se estagnada e em oscilação (CONAB, 2020).

Na safra 2019/2020, de acordo com a Conab (2020), a área colhida de cana-de-açúcar no Brasil destinada à atividade sucroalcooleira foi de 8,44 milhões hectares, com uma produção de 642,72 milhões de toneladas e produtividade média de 76.133 kg/ha.

De acordo com a Conab (2020), a Região Norte apresenta três estados produtores de cana-de-açúcar que são: Amazonas, Pará e Tocantins, os quais juntos foram responsáveis por apenas 0,56 % da produção brasileira na safra 2019/20. Nessa mesma safra, constata-se que a área colhida (27,7 mil ha) e a produção de cana-de-açúcar (2,23 milhões t) no Estado do Tocantins, representou 60,7 % e 60,0 % da área total colhida e da produção da região Norte, respectivamente. Apesar da produtividade média na safra 2019/20 do Tocantins (80.766 kg/ha), ter sido inferior à média da Região Norte (81.726 kg/ha), conseguiu superar a média nacional (76.133 kg/ha).

A cana-de-açúcar produzida no Estado do Tocantins representa apenas 0,35% da produção nacional e 0,49 % da produção de etanol total (CONAB, 2020).

A produção da indústria sucroalcooleira, referente à safra 2019/20 no Brasil, foi de 29,8 milhões toneladas de açúcar e aproximadamente 34 bilhões de litros de etanol, sendo 10,12 bilhões de litros de etanol anidro (29,76 %) e 23,88 bilhões de litros de etanol hidratado (70,24 %) (CONAB, 2020).

No Tocantins nessa mesma safra produziu-se apenas etanol, cujo volume global atingiu 166.370.000 litros, sendo que desse total, 81.536.000 litros correspondeu à produção de etanol anidro e o restante (84.834.000 litros) referente ao etanol hidratado (CONAB, 2020).

A expectativa para a produção de cana-de-açúcar na safra 2020/21 era considerada otimista no início de 2020, devido às condições meteorológicas favoráveis à cultura nas principais regiões produtoras do país, bem como o comportamento do mercado que sinalizava para bons preços, para o açúcar e o etanol. Contudo, devido a ocorrência da pandemia do novo coronavírus, provocou reflexos negativos no mercado e com isso, reduziu-se a perspectiva de aumento da produção para a safra 2020/21. Nesse sentido, estima-se que haverá uma redução da produção de cerca de 1,9% em relação à safra de 2019/20 (CONAB, 2020).

O setor sucroalcooleiro sofreu oscilação, apresentando um forte crescimento no período de 2003–2009, estimulado por políticas públicas do governo federal, seguido de crise e estagnação nos anos de 2010 – 2014 (MME, 2016). Porém, em 2016 foi lançado pelo governo federal, por iniciativa do Ministério de Minas e Energia, o Programa RenovaBio 2030, que tem como objetivo:

Garantir a expansão da produção de biocombustíveis no país, baseada na previsibilidade, na sustentabilidade ambiental, econômica e financeira, em harmonia com o compromisso brasileiro na COP21 e compatível com o crescimento do mercado (MME, 2016, p. 2).

Com isso, espera-se um aumento da demanda do etanol brasileiro onde prevê-se um novo incremento da produção da cultura da cana-de-açúcar, para atender o dobro da oferta de etanol até 2030 (MME, 2016).

Como a cana-de-açúcar é considerada uma cultura semi-perene e exige-se elevado investimento para a implantação da infraestrutura agroindustrial numa região, torna-se necessária a identificação de regiões potencialmente adequadas ao cultivo, pois possivelmente poderão ser incorporadas ao sistema produtivo nacional (COLLICCHIO, LOPES; MARCOLINI, 2019). Contudo, para o bom desempenho da cultura, as condições climáticas devem ser observadas, pois se uma região dispõe de solos favoráveis e tecnologias adequadas, mas apresenta risco climático elevado, pouco colaborarão para atenuar esta vulnerabilidade (ZULLO JUNIOR; ASSAD; PINTO, 2008).

Nesse sentido, o zoneamento agroclimático é fundamental para organização dos programas de trabalho e suporte do planejamento da

agricultura (ALMEIDA; CALIJURI; PINTO, 2013), permitindo regionalizar áreas de maior risco para a cultura, no espaço e no tempo, utilizando-se as redes meteorológicas (ROSSETTI, 2001; BRASIL, 2017).

O zoneamento agroclimático e ambiental da cultura da cana-de-açúcar deve estar em consonância com o Zoneamento Ecológico-Econômico – ZEE, pois favorece a execução do planejamento agrícola e do meio ambiente de um governo, uma vez que se novos empreendimentos cumprirem todas as responsabilidades para seu funcionamento, poderão usufruir de benefícios específicos, como possíveis financiamentos públicos, incentivos fiscais, apoio à infraestrutura e técnico-científico, de forma direcionada em regiões consideradas pelo governo, evitando assim pulverização da aplicação de recursos públicos (COLLICCHIO *et al.*, 2015).

As condições climáticas podem ser consideradas as mais importantes na avaliação da aptidão agrícola, porque praticamente não podem ser modificadas, com exceção da deficiência hídrica, que em algumas situações pode ser atenuada com o uso da irrigação (RANIERI; BARRETO; KLUG, 2007).

Ao mesmo tempo, tem sido constatado que as concentrações atmosféricas globais de GEE, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) aumentaram significativamente em consequência das atividades humanas desde 1750, excedendo os níveis pré-industriais em cerca de 40%, 150% e 20%, respectivamente (IPCC, 2013).

O CO<sub>2</sub> é o GEE antrópico mais importante, sendo que a sua concentração atmosférica global aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 280 ppm para 379 ppm em 2005 (IPCC, 2007) e em 2017, a concentração de CO<sub>2</sub> superou 400 ppm, a qual ultrapassou a faixa natural dos últimos 650.000 anos (180 a 300 ppm). O dióxido de carbono atmosférico continuou seu rápido aumento, atingindo no mês de maio de 2021, a média de 419,13 ppm, registrada pelo Observatório de Mauna Loa da National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (NOAA, 2021).

Diante desses fatos, poderá ocorrer a elevação do risco climático em algumas regiões produtoras atuais, devido ao aumento da temperatura do ar, conforme projeções dos modelos climáticos apresentados no Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR4 - IPCC), que indicam um aquecimento médio global da superfície do planeta, variando de 1,8°C a 4°C até o final do século XXI, tomando-se como referência o período de 1980 a 1999 (IPCC, 2007). Já o Quinto Relatório de Avaliação (AR5 - IPCC) indica que esse aumento seria de 2,6°C a 4,8°C na temperatura média global (IPCC, 2013).

Essas projeções do IPCC têm provocado inquietações no meio técnico-científico ligado ao setor agropecuário, o que tem estimulado a realização de estudos mostrando o efeito das mudanças do clima, considerando estes cenários de emissões, sobre o zoneamento agroclimático de culturas. Nesse contexto,

têm sido realizados no Brasil, estudos para diversas culturas, como: do café em São Paulo (ASSAD *et al.*, 2004), arroz, soja, milho e feijão (ASSAD; PINTO; ZULLO JUNIOR, 2007), da cana-de-açúcar para o Tocantins (COLLICCHIO, 2008), para a Zona da Mata do Pernambuco (SANTIAGO, 2015) e para o Brasil (MANZATTO *et al.*, 2009), bem como da seringueira para o Espírito Santo (CAMPANHARO *et al.*, 2011), e do eucalipto (MARCOLINI, 2014) e da seringueira (NAVES-BARBIERO, 2014) para o Estado do Tocantins.

O levantamento da vulnerabilidade agroambiental do setor sucroalcooleiro em relação à climatologia atual e às mudanças climáticas é estratégico, pois permite determinar o potencial da cultura para uma região, visando realizar o planejamento de médio e longo prazo (ZULLO JUNIOR; ASSAD; PINTO, 2008).

O presente trabalho teve como objetivo geral de elaborar o zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar no Estado do Tocantins, considerando a condição do clima atual e projeções de possíveis impactos das mudanças climáticas com base nos resultados dos modelos GFDL e HadCM3 para dois cenários de emissões, que integram o AR4 do IPCC (2007), bem como dos modelos Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES, para dois cenários do AR5 (IPCC, 2013), considerando o período de 2021 a 2050.

## 2 - Procedimentos metodológicos

A área de estudo compreende o limite político-administrativo do estado do Tocantins, localizado na região Norte, com uma área total de 277.620 km<sup>2</sup>.

Para a realização deste trabalho, utilizou-se os dados meteorológicos organizados por Collicchio (2008), provenientes de estações meteorológicas e pluviométricas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, Agência Nacional de Águas - ANA, Secretaria de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Tocantins - SEAGRO e Embrapa, situadas no Tocantins e estados circunvizinhos, compreendidas entre os paralelos 4°30' e 13°30' Sul e meridianos 45°30' e 51°30' Oeste.

Esses dados serviram de base para obter as evapotranspirações potenciais pelo método de Thornthwaite (1948) e na sequência calcular o balanço hídrico climatológico de Thornthwaite; Mather (1955), para cada situação, conforme simplificado por Pereira (2005), utilizando-se a  $CAD = 100$  mm (CECÍLIO *et al.*, 2003; WALDHEIM *et al.*, 2006; BARBARISI *et al.*, 2007; MARIN *et al.*, 2007). Ambas as metodologias foram trabalhadas pela interface desenvolvida por Victoria *et al.* (2007), que utilizaram da calculadora de mapas do GRASS GIS, um sistema de informações geográficas gratuito, para execução da metodologia citada, usando os mapas de precipitação mensal e de temperatura média mensal, derivados do método de interpolação *Spline* com Tensão Regularizada.

Com relação à exigência térmica da cultura adotou-se a temperatura basal inferior ( $T_b$ ) de 20°C (DOORENBOS; KASSAM, 1994) e a superior ( $T_B$ ) igual a 38°C (FAUCONIER; BASSEREAU, 1975; BARBIERI; VILLA NOVA, 1977).

A partir dos mapas de temperatura média e deficiência hídrica anual ( $D_a$ ) delimitou-se as zonas ou classes de aptidão, para definir as áreas de exploração da cultura da cana-de-açúcar no estado do Tocantins, classificando-as em: inapta, apta, marginal, restrita ao cultivo (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação das zonas de aptidão, de acordo com os parâmetros agroclimáticos da cultura da cana-de-açúcar

Classe de Aptidão	Exigência Hídrica $D_a$ (mm)	Condições
Inapta	$0 < D_a \leq 10$	Ausência de período seco necessário para a maturação e colheita
Apta	$10 < D_a \leq 250$	Condição hídrica favorável
Marginal	$250 < D_a \leq 400$	Restrição hídrica – Apta com irrigação de salvamento ou complementar
Restrita	$D_a > 400$	Restrição hídrica acentuada - Apta com irrigação plena (imprescindível)

Nota: Exigências térmicas da cultura:  $T_b = 20$  °C e  $T_B = 38$  °C e  $CAD = 100$  mm

Fonte: Adaptado de Camargo *et al.* (1977) e Brunini *et al.* (2008)

Com relação aos possíveis reflexos das mudanças do clima no zoneamento de aptidão agroclimática da cana-de-açúcar, foram realizados dois estudos distintos, sendo que usou-se dois modelos climáticos e dois cenários de emissões distintos, relacionados ao Quarto Relatório de Avaliação – AR4 do IPCC (2007), e ao Quinto Relatório de Avaliação – AR5 do IPCC (2013), conforme descrito a seguir.

No primeiro estudo que refere-se ao Quarto Relatório de Avaliação – AR4, foram utilizados os dados de saída dos modelos climáticos do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, (GFDL-CM 2.1), do National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, dos Estados Unidos e do Hadley Centre Coupled Model, version 3 (HadCM3), do Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra. Para cada modelo, realizou-se as projeções do clima para o período entre 2021 e 2050, considerando os cenários  $B_1$  (Cenário de baixa emissão - otimista) e  $A_1B$  (Cenário intermediário).

Neste trabalho foi necessário realizar um procedimento de correção com o objetivo de adequar os dados simulados à realidade, uma vez que o clima presente simulado pelos dois modelos apresentavam desvios em relação ao clima observado. Para isso, utilizou-se o método adotado por Minguez *et al.* (2004) e Salati *et al.* (2007), conforme apresentado na Figura 1.

De acordo com o fluxograma das atividades (Figura 1), foram elaborados os mapas do zoneamento agroclimático da cultura, considerando os efeitos projetados por cada um dos dois modelos (GFDL e HadCM3), para os cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B, no período entre 2021 e 2050, tomando como base a classificação de aptidão adotada e apresentada na Tabela 1.

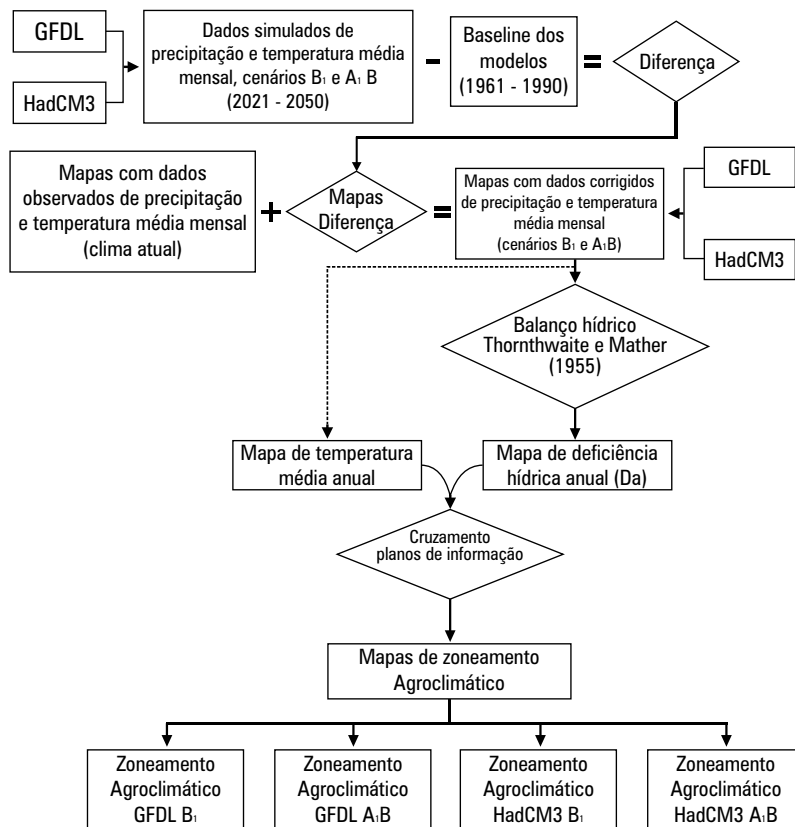


Figura 1 - Procedimento de correção dos dados do clima futuro para a elaboração dos zoneamentos agroclimáticos para a cana-de-açúcar, considerando os modelos GFDL e HadCM3 para os cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B (Quarto Relatório de Avaliação – AR4/IPCC)

No segundo estudo referente ao Quinto Relatório de Avaliação – AR5, foram utilizados os dados de saída dos modelos regionais Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES, os quais são resultantes de um downscaling dos modelos climáticos globais MIROC5 e HadGEM2-ES do AR5 do IPCC. Todos os dados foram disponibilizados gratuitamente pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As projeções climáticas para os anos de 2021 a 2050, obtidas por cada um dos modelos, considerou dois caminhos representativos de concentração (Representative Concentration Pathways - RCP) de CO<sub>2</sub> atmosférico, o RCP 4.5 W/m<sup>2</sup> e RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>.

Os dados de precipitação e de temperatura médias mensais das estações meteorológicas e pluviométricas serviram de base para correção destas variáveis climáticas projetadas pelos dois modelos para período de 2021 a 2050, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5. Tal procedimento foi feito para dirimir os erros de dispersão entre as estimativas e a realidade climática atual, extraída das plataformas meteorológicas.

A temperatura mensal entre os anos de 2021 a 2050, para cada RCP, foi corrigida (diminuindo seu viés estatístico em relação as temperaturas mensais do período atual) somando-se o seu valor estimado pela diferença entre as médias das temperaturas observadas pelos dados coletados e projetadas pelo modelo. Esta metodologia pode ser melhor compreendida pela Equação 1 (LENDERINK *et al.*, 2007). Nesta expressão percebe-se que cada mês da série histórica delineada em diferentes perspectivas pelos modelos climáticos regionais citados acima, tem sua condicionante térmica trabalhada por um fator de correção, um delta de aproximação específico, que não afeta o padrão de distribuição temporal simulado para o futuro (apenas em sua magnitude) e por esta razão este passo metodológico é denominado de Direct Change Approach (OLIVEIRA; PEDROLO; CASTRO, 2015).

$$T_{cor} = T_{sim(j,k)} + [\overline{T_{obs(j)}} - \overline{T_{sim(j)}}] \quad \text{Equação 1}$$

O mesmo ocorre para a variável de precipitação simulada para as duas considerações futuras (RCP 4.5 e RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>). Entretanto a pluviosidade determinada pelo modelo no intervalo de tempo mencionado não é somada às variações anteriormente descritas, e sim multiplicada pela relação entre as lâminas d'água precipitadas observadas e estimadas durante a "baseline" (época correspondente à amostragem dos pluviômetros), em concordância com a Equação 2 (LENDERINK *et al.*, 2007). Este processo foi teoricamente concebido assim como para a correção utilizada das discrepâncias térmicas, uma vez que mantém a estatística de recorrência (a variância) dos eventos anômalos projetados e demais características do clima prospectado, não se sujeitando a análise às variâncias registradas pelas estações. Apenas procura contrair as mudanças sazonais possíveis entre a realidade climática e o seu futuro próximo (OLIVEIRA; PEDROLO; CASTRO, 2015).

$$P_{cor} = P_{sim(j,k)} \cdot \left[ \frac{P_{obs(j)}}{P_{sim(j)}} \right] \quad \text{Equação 2}$$

Com estes parâmetros corrigidos procedeu-se a realização de quatro balanços hídricos normais para obter os zoneamentos agroclimáticos da cultura considerando os efeitos projetados pelos dois modelos (Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, no período entre 2021 e 2050, considerando a Tabela 1.



### 3 – Resultados e Discussão

#### 3.1 - Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar, considerando a climatologia atual e cenários futuros do AR4

Considerando a climatologia atual do Estado do Tocantins, Collicchio (2008) obteve estimativas de temperatura média anual (25,7°C), precipitação pluviométrica anual (1650 mm) e deficiência hídrica anual (411 mm), com valores similares aos obtidos por Roldão; Ferreira (2019), com exceção da temperatura média anual, que foi de cerca de 25°C.

Os aumentos das temperaturas médias anuais observados em ambos os modelos e cenários, não impactaram negativamente na aptidão ao cultivo, pois ficaram dentro do intervalo de exigência térmica da cultura, ou seja, entre 20°C e 38°C (Tabela 1). Por isso, não foi identificada em nenhuma situação com zona de aptidão “inapta”. Porém esse aumento da temperatura, associado às alterações dos totais de precipitação anual em relação ao clima atual, provocou reflexos nos balanços hídricos, gerando um aumento na deficiência hídrica anual (Da) média de cada cenário e na média dos modelos, conforme esperado e também observado por Barbarisi *et al.* (2007).

A Da média do modelo GFDL atingiu 577 mm e do HadCM3 foi de 613 mm, correspondendo aos respectivos incrementos de 40% e 49% sobre a Da média do clima atual. Constatou-se também os aumentos da Da média de 42% para o cenário B<sub>1</sub> e de 47% para A<sub>1</sub>B em relação à Da média do clima atual, resultados concordantes foram obtidos por Salati *et al.* (2007).

Comparando a situação climática atual com os resultados das simulações dos modelos e cenários: GFDL\_B<sub>1</sub>, GFDL\_A<sub>1</sub>B, HadCM3\_B<sub>1</sub> e HadCM3\_A<sub>1</sub>B, sobre o zoneamento agroclimático para a cana-de-açúcar, observa-se que houve uma mudança extrema com relação à aptidão da cultura dentro do Estado (Figuras 2 e 3).

Mesmo com o modelo/cenário mais otimista (GFDL\_B<sub>1</sub>), já constata-se uma acentuada alteração no delineamento do zoneamento agroclimático para a cana-de-açúcar no Estado, ocorrendo redução das áreas com possibilidades de cultivo da cultura com irrigação de salvamento ou suplementar (classe de aptidão “marginal”), deslocando-as para as regiões noroeste e no extremo sudeste do Tocantins (Figura 2b), ampliando a área de aptidão climática “restrita” para aproximadamente 96% (Tabela 2).

Considerando o modelo/cenário GFDL\_A<sub>1</sub>B, a Da apresentaria uma variação de 324 a 887 mm, sendo assim, áreas com aptidão “marginal” passariam para “restrita”, fazendo com que praticamente todo o Estado necessitasse de irrigação plena (98,3%), com exceção da região noroeste e pequena porção no sudeste (1,7% da área) que continuaria sendo classificada como aptidão “marginal” (Figura 2c).

Nesse sentido, dentro do mesmo modelo (GFDL) e cenários distintos registra-se que houve um decréscimo da área da classe “marginal” de 4% em B<sub>1</sub>, para 1,7% em A<sub>1</sub>B.

O modelo/cenário HadCM3\_B<sub>1</sub> causaria um impacto mais severo sobre o zoneamento, uma vez que a totalidade do Estado teria restrição climática para o cultivo de sequeiro da cana-de-açúcar, devido à elevada deficiência hídrica anual, uma vez que a Da mínima seria de 404 mm e a máxima atingiria 819 mm.

Na situação HadCM3\_A<sub>1</sub>B verifica-se uma pequena área representando 2% do total, localizada na porção sul-sudeste do Estado, com classe de aptidão “marginal”. Esse pequeno aumento da área restrita em relação ao HadCM3\_B<sub>1</sub> provavelmente aconteceu porque a Da mínima calculada em A<sub>1</sub>B foi inferior (285 mm) e a Da média também foi menor.

Para este fato percebe-se também que do cenário B<sub>1</sub> para A<sub>1</sub>B houve um deslocamento da “mancha” de Da mais acentuada da região sudoeste-sul para a nordeste-norte do Estado. Isso devido possivelmente ao incremento da temperatura média anual nas regiões centro-norte do Estado, associado à redução das chuvas na porção nordeste-norte e aumento da pluviosidade em toda região sul do Tocantins. Com referência apenas aos efeitos dos cenários entre os modelos sobre o zoneamento agroclimático da cultura, que para o cenário B<sub>1</sub> com dados do GFDL, o zoneamento apresentou duas classes de aptidão climática: “marginal” (4%) e “restrita” (96%) e referente ao HadCM<sub>3</sub> já não se constatou áreas com aptidão “marginal”, sendo que todo o Estado necessitaria de irrigação freqüente.

Tabela 2 - Área estimada do estado do Tocantins em percentual, por classe de aptidão climática para cultivo da cana-de-açúcar resultante da simulação dos distintos modelos e cenários de mudanças climáticas, em relação ao clima na condição atual

Modelos/ Cenários	Área do Estado por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%)		
	Apta	Marginal	Restrita
Clima Atual	0,1	41,7	58,2
GFDL_B <sub>1</sub>	0,0	4,0	96,0
GFDL_A <sub>1</sub> B	0,0	1,7	98,3
HadCM <sub>3</sub> _B <sub>1</sub>	0,0	0,0	100,0
HadCM <sub>3</sub> _A <sub>1</sub> B	0,0	2,0	98,0

<sup>1</sup>Área em % aproximada, estimada pelo SIG

Área total do estado do Tocantins: 277.620 km<sup>2</sup>

Constatou-se que a temperatura média anual de ambos os modelos são similares, porém a precipitação média anual do modelo HadCM<sub>3</sub> decresceu em relação ao GFDL, em cerca de 135 mm. Isso provavelmente refletiu no cálculo do

balanço hídrico, gerando uma Da média no GFDL (555 mm) menor que a do HadCM<sub>3</sub> (617 mm), cuja Da mínima neste cenário correspondeu a 404 mm, enquadrando-se de forma direta na classe de aptidão “restrita”.

Para o cenário A<sub>1</sub>B, em ambos os modelos o zoneamento apresentou duas classes de aptidão climática: “marginal” e “restrita”, cujas áreas médias percentuais calculadas foram semelhantes, sendo 1,7% e 2,0% para os modelos GFDL e HadCM<sub>3</sub>, respectivamente (Tabela 2). Entretanto as áreas da classe “marginal” provenientes dos distintos modelos se diferenciaram quanto à localização no Estado (Figuras 2c e 3c).

A temperatura média anual de ambos os modelos se assemelham, com diferença entre elas de apenas 0,2°C, o mesmo acontecendo para a precipitação anual e deficiência hídrica anual, embora as amplitudes do último parâmetro sejam distintas.

No caso do modelo GFDL a ocorrência da classe de aptidão climática “marginal” ocorreu na parte noroeste do Estado, em duas regiões descontínuas, e numa pequena porção à sudeste, isso porque foi detectada maior quantidade de chuva e temperatura mais amena nesses locais, refletindo nos valores de Da variando de 370 a 400 mm.

Fato semelhante aconteceu para o modelo HadCM<sub>3</sub>, cuja área com classe de aptidão “marginal” limitou-se à região sul-sudeste do Estado.

Quando realizado a comparação entre modelos, ambos indicaram uma tendência de aumento significativo da deficiência hídrica anual, o que contribuiu de forma fundamental para aumentar a área da classe de aptidão “restrita”, do cenário B<sub>1</sub> para A<sub>1</sub>B.

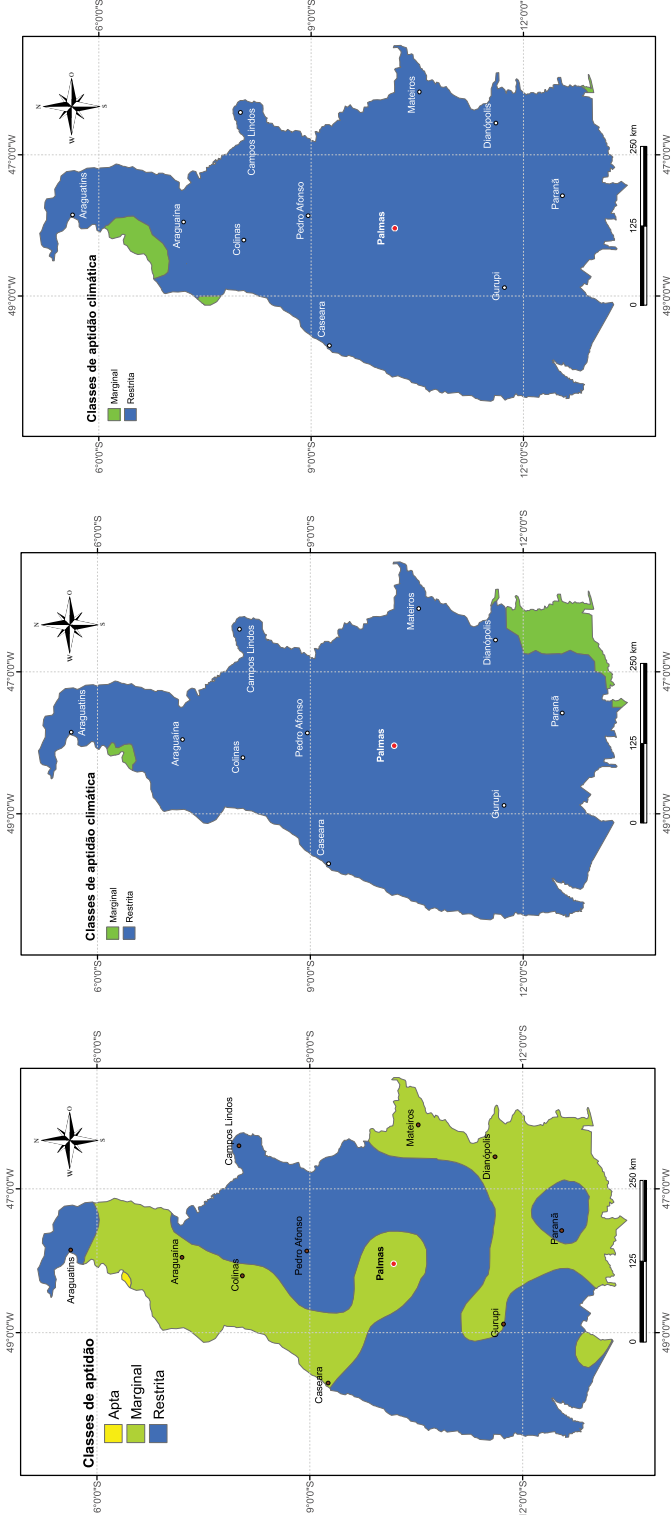
Ao analisar os modelos sob o mesmo cenário percebe-se discordância quanto ao cenário B<sub>1</sub>, uma vez que o HadCM<sub>3</sub> projetou resultados mais pessimistas, mas no cenário A<sub>1</sub>B ambos foram coincidentes.

Apesar das diferenças entre os modelos analisados neste trabalho, permite afirmar que haverá um agravamento do efeito da deficiência hídrica para todos os cenários futuros, reduzindo significativamente as regiões de aptidão consideradas “apta” e “marginal”. Isso colocaria praticamente todo o Estado na condição de aptidão “restrita” para o cultivo da cana-de-açúcar, a não ser que fosse irrigado.

Sendo assim, as regiões com necessidade de irrigação plena aumentariam consideravelmente em relação a suplementar, e a possível expansão do setor sucroalcooleiro para o Tocantins dependerá de irrigação para obter o máximo de produtividade.

Contudo, o uso de irrigação plena poderia onerar o custo de produção, associado ao fato que o elevado consumo de água devido ao aumento da deficiência hídrica do solo, poderia causar problemas de disponibilidade de água em algumas regiões, ou mesmo não ser concedida pelo órgão ambiental, a outorga de uso dos recursos hídricos para este fim.

Situação Climática Atual e Cenários Futuros para o Cultivo da Cana-de-Açúcar (Modelo GFDL-CM 2.1, período: 2021 – 2050)



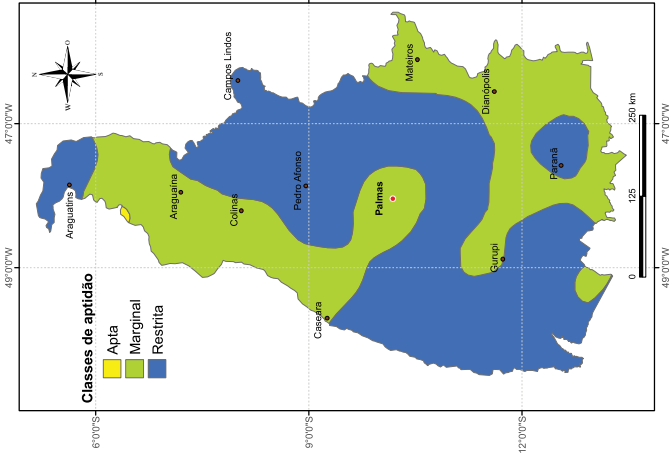
(a) Situação climática atual

(b) GFDL\_Cenário B<sub>1</sub>

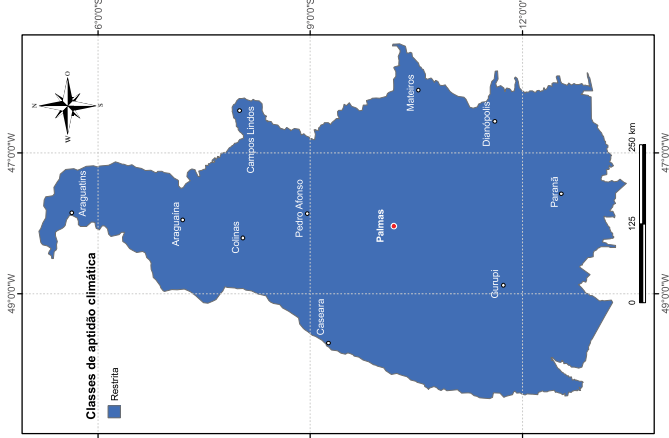
(c) GFDL\_Cenário A<sub>1</sub>B

Figura 2 – Situação climática atual e cenários futuros para o cultivo da cana-de-açúcar no estado do Tocantins considerando o Modelo GFDL-CM 2.1, para o período de 2021 – 2050 (AR4/IPCC)

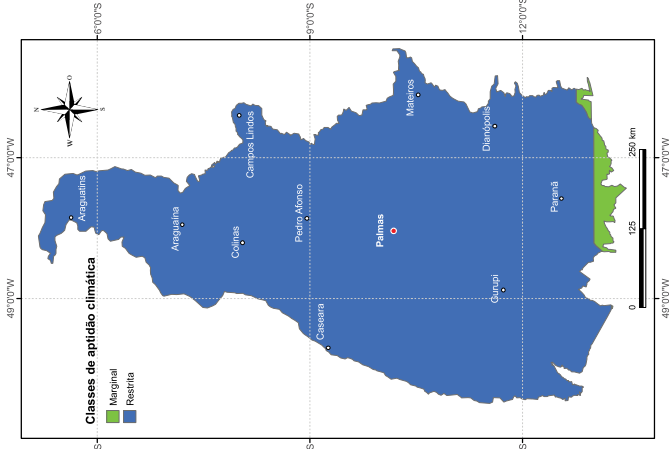
Situação Climática Atual e Cenários Futuros para o Cultivo da Cana-de-Açúcar (Modelo HadCM3, período: 2021 – 2050)



(a) Situação climática atual



(b) HadCM3\_Cenário B<sub>1</sub>



(c) HadCM3\_Cenário A<sub>1B</sub>

213 Figura 3 - Situação climática atual e cenários futuros para o cultivo da cana-de-açúcar no estado do Tocantins considerando o Modelo HadCM3, para o período de 2021 – 2050 (AR4/IPCC)

### 3.2 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar, considerando a climatologia atual e cenários futuros do AR5

A zona de aptidão agrícola do modelo Eta MIROC5 para cenário intermediário (RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>), prospectada para o período de 2021 a 2050 é similar ao do modelo GFDL-CM 2.1, cenário A<sub>1</sub>B (cenário intermediário), do relatório AR4 (IPCC, 2007). Em ambos os casos, visualiza-se uma diminuição significativa das classes de aptidão “marginal” em termos de disponibilidade hídrica.

Sendo assim, no estudo que envolveu o modelo GFDL-CM 2.1 e cenário A<sub>1</sub>B (AR4), a redução observada da classe de aptidão “marginal”, foi de 41,7% (clima atual) para 1,7%, enquanto no Eta MIROC5 e RCP 4.5 (AR5), decresceu de 44,4% (clima atual) para apenas 1,2%. (Tabela 2 e 3). Nas duas situações, o cultivo comercial da cana-de-açúcar requererá o uso de sistema de irrigação suplementar ou de salvamento (Tabela 1). Destaca-se que essa zona “marginal” localiza-se na microrregião de Araguaína, no município de Xambioá e entorno, assim como observado no trabalho de Collicchio *et al.* (2015), e constatado nas Figuras 2c e 4a.

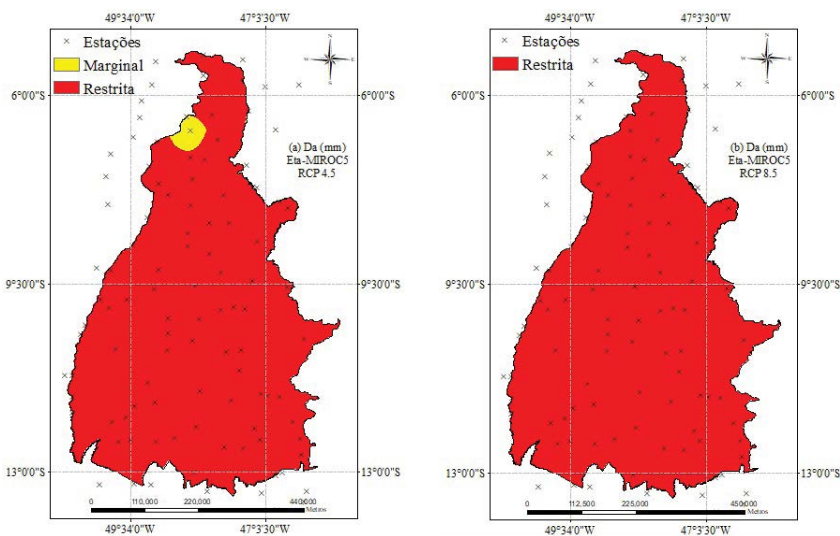
Tabela 3 – Área estimada de aptidão agrícola para a cana-de-açúcar no Estado do Tocantins (em %) para o clima atual e futuro (2021 a 2050), considerando dois cenários dos modelos Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES

Modelos/Cenários	Área do Estado por classe de aptidão climática <sup>1</sup> (%)		
	Apta	Marginal	Restrita
Clima Atual	0,14	44,40	55,46
Eta MIROC5_ RCP 4.5	0,00	1,20	98,80
Eta MIROC5_ RCP 8.5	0,00	0,00	100,00
Eta HadGEM2-ES_ RCP 4.5	0,00	0,00	100,00
Eta HadGEM2-ES_ RCP 8.5	0,00	0,00	100,00

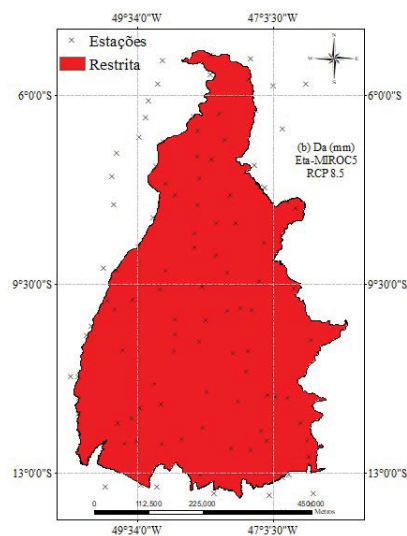
<sup>1</sup>Área aproximada (em %), estimada pelo SIG

A microrregião de Araguaína apresentou uma condição mais favorável de acordo com os resultados dos modelos GFDL-CM 2.1 (AR4) e Eta MIROC5 (AR5), para o cenário otimista, a qual encontra-se parcialmente dentro do bioma Amazônia, que corresponde a 8,9% do território tocantinense. Esse fato pode ser atestado por Vianna; Sentelhas (2014) e Roldão; Ferreira (2019), os quais mostraram que essa região possui menor deficiência hídrica anual. Com isso, apesar desse cenário, Vianna; Sentelhas (2014) considerando a climatologia atual, afirmaram que a região de Araguaína, é a que apresenta o menor risco associado à eficiência climática para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no país. Tornando essa região, vantajosa em comparação às outras áreas cultivadas ou com potencial de cultivo no Brasil, como declaradas pelo projeto do INPE de monitoramento anual do plantio dessa cultura (CANASAT, 2013).

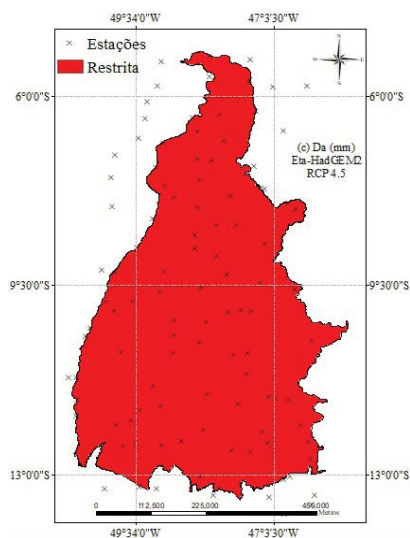
### Cenários Futuros para o Cultivo da Cana-de-Açúcar (Modelos Eta MIROC5 e Eta HadGEM2, período: 2021 – 2050)



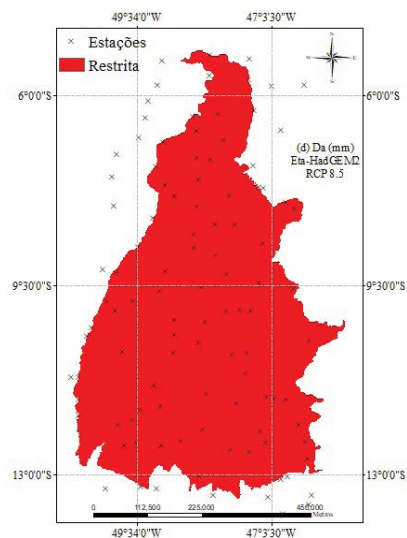
(a) Eta MIROC5 e cenário RCP 4.5



(b) Eta MIROC5 e cenário RCP 8.5



(c) Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 4.5



(d) Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 8.5

Figura 4 - Zoneamentos agrícolas da cana de açúcar considerando as variáveis climáticas entre 2021 a 2050 prospectadas pelo modelo Eta MIROC5 e cenários RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b) e para o modelo Eta HadGEM2-ES e cenários RCP 4.5 (c) e RCP 8.5 (d) (AR5/IPCC)

O modelo Eta MIROC5 para o cenário RCP 8.5, assim como o modelo Eta HadGEM2-ES considerando todos os seus cenários (Figura 4b, 4c e 4d), mostram “restrições” sensíveis ao plantio desta cultura agroenergética, sendo impossibilitado o seu manejo nas condições sequeiro em todo o Estado do Tocantins.

Pelos resultados, constatou-se que à semelhança das projeções dos modelos/cenários do AR4, as relativas ao AR5, indicam que no Tocantins não deverão ter regiões “inaptas” considerando a restrição térmica. Isso porque, a maior e a menor temperatura média anual verificada, corresponderam a 30,9°C (Modelo Eta HadGEM2-ES para RCP 8.5) e 25°C (Modelo Eta MIROC5 para RCP 4.5), respectivamente.

Nesse contexto, com base na constatação da predominância de deficiência hídrica mais elevada nos zoneamentos agroclimáticos tanto para a condição da climatologia atual, quanto considerando os cenários futuros, sugere-se a necessidade de promoção de políticas públicas, financiamentos e de maiores investimentos em tecnologias de adaptação, como a utilização de variedades mais adaptadas às condições ambientais locais, manejo da cultura e do solo e uso de irrigação.

#### **4 - Considerações Finais**

Os resultados obtidos no presente estudo sugerem que não haverá restrição térmica para o cultivo da cana-de-açúcar, tanto sob as condições climáticas atuais, quanto para o conjunto de cenários climáticos futuros analisados.

De modo geral observou-se um incremento da deficiência hídrica anual para todos os cenários, mas com variações de intensidade regionais. Devido às elevadas deficiências hídricas observadas, para que a cultura tenha um desenvolvimento adequado e obtenha boa produtividade, será necessário dependendo da intensidade do déficit hídrico, utilizar irrigação de salvamento, suplementar ou plena, na estação da seca.

Constatou-se também que os modelos HadCM3 (AR4) e Eta HadGEM2-ES (AR5) apresentaram maior deficiência hídrica anual média do que o GFDL (AR4) e o Eta MIROC5 (AR5).

As simulações dos balanços hídricos realizadas para o Estado do Tocantins, considerando os cenários de mudanças climáticas, mostraram uma redução muito significativa das regiões de aptidão agroclimática “marginal” (apta com irrigação de salvamento ou suplementar) referente aos cenários do AR4 e redução total em todos os cenários do AR5, com exceção do Eta MIROC5 cenário RCP 4.5. Ou seja, considerando as atuais tecnologias aplicadas, as regiões que utilizam irrigação plena, deverão aumentar em relação à de salvamento e suplementar, apontando em direção à um potencial de inviabilização do cultivo da cana-de-açúcar no Estado.



Em regiões climaticamente “restritas” e/ou “marginais”, onde a produção de alimentos poderá ser mantida com o uso de irrigação e estando a cana-de-açúcar presente, esta poderá vir a competir por água, apesar das destilarias aproveitarem comumente a vinhaça para fertirrigação.

Particularmente, os resultados das simulações deste trabalho buscaram horizontes prognósticos próximos do momento presente, ou seja, de 2021 até 2050. Assim as projeções deste estudo sugerem reforçar o alerta para a necessidade de tomada de decisões antecipadas, a fim de atenuar os possíveis impactos futuros.

Dentre diversas medidas que poderão ser tomadas para enfrentamento das mudanças climáticas, pesquisas agronômicas nas áreas de biotecnologia e melhoramento genético poderão dar uma valiosa contribuição, como por exemplo: o desenvolvimento de materiais genéticos tolerantes às altas temperaturas e à deficiência hídrica, e que visem a potencialização do efeito benéfico das elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Em algumas regiões produtoras vulneráveis, as mudanças tecnológicas poderão atenuar os efeitos negativos das mudanças climáticas. Portanto há a necessidade de análises e estudos mais aprofundados sobre o tema nessas regiões, o que implica na ampliação de investimentos em pesquisas e no desenvolvimento de tecnologias apropriadas.

## **Agradecimentos**

Ao Governo do Estado do Tocantins, por meio da Universidade Estadual do Tocantins – UNITINS, Secretaria da Agricultura, Pecuária e Aquicultura – Seagro e da antiga Secretaria de Ciência e Tecnologia – SECT;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES;

Ao Laboratório de Geoprocessamento e Tratamento de Imagens do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo - CENA/USP;

Ao Laboratório de Agroenergia, Uso da Terra e Mudanças Ambientais - LAMAM, da Universidade Federal do Tocantins - UFT.

## Referências

- ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.3, p. 352-355. 2013.
- ASSAD, E. A.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, nov. 2004.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. Impacts of global warmin in the brazilian agroclimatic risk zoning. In: DIAS, P. L. da S.; RIBEIRO, W. C.; NUNES, L. H. **A contribution to understanding the regional impacts of global change in South America**. São Paulo: IEA/USP, 2007. p.175 – 182.
- BARBARISI, B. F.; MARIN, F. R.; ASSAD, E. A.; BARBARISI, B. F.; PILAU, F. G.; PACHECO, L. R. F. Efeito da mudanças climáticas sobre a aptidão climática para cana-de-açúcar no Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBA, 2007.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: Planalsucar, p.1-22.1977.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. **Plano Nacional de Agroenergia, 2006 - 2011**. 2. ed. rev. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola**. Brasília: MAPA. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscoseguro/risco-agropecuario/zoneamento-agricola>>. Acesso em: 04 jan. 2020.
- BRUNINI, O; PRADO, H. do; LANDELL, M. G. A.; CARVALHO, J. P. de; BRUNINI, A.; MORAIS, J. F. L. de. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo**: aptidão edafoclimática da cana-de-açúcar. Campinas: IAC, 2008. 31p.
- CAMARGO; A. P. de; ALFONSI; R. R.; PINTO, S. H.; CHIARINI, J. V. Zoneamento da aptidão climática para culturas comerciais em zonas de cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, 4., **Anais...** São Paulo: Ed. USP, 1977. p. 89-105.
- CAMPANHARO, W. A.; CECÍLIO, R. A.; SPERANDIO, H. V.; JESUS JÚNIOR, W. C.de; PEZZOPANE, J. E. M. Potencial impacto das mudanças climáticas sobre o zoneamento agroclimático para a seringueira no Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, n. 39, p. 105-116. 2011.

CECÍLIO, R. A.; MEDEIROS, S. de S.; DANTAS NETO, F. S.; SOUZA, J. A. A. de; SOARES, A. A. de. Zoneamento climático associado ao potencial de cultivo das culturas do café, cana-de-açúcar e amendoim nas sub-bacias do alto e médio São Francisco em Minas Gerais. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE SENSORAMENTO REMOTO, 9., 2003. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2003. p. 39-45.

COLLICCHIO, E. **Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cultura da cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado do Tocantins**. 2008. 157 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Piracicaba, 2008.

COLLICCHIO, E.; ROCHA, H. R.; VICTORIA, D. de C.; BALLESTER, M. V. R.; TOLEDO, A. M. A. Implicações das mudanças do clima no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado de Tocantins, considerando o modelo GFDL. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 08, n. 06, p. 1730-1747, 2015.

COLLICCHIO, E.; LOPES, R. B. S.; MARCOLINI, M. de P. Análise dos possíveis efeitos das mudanças do clima no cultivo da cana-de-açúcar e do eucalipto no estado do Tocantins. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 6, n.1, p. 1-17, 2019.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Indicadores de agropecuária. **Observatório Agrícola**, v. 6, p. 1-116. 2017. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em: 13 out. 2019.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: safra 2020/21, v. 7, n.1, Primeiro levantamento, maio 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33)

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La cana de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

IPCC. **IPCC WG1 Fourth assessment Report**. Paris, 2007. 21p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX V.; MIDGLEY, P. M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, New York. 1.535 p.

JANDREY, D. B.; SILVA, P. R. F. da; FEDERIZZI, L. C.; VIEIRA, V. M.; SANGOI, L. Agroenergia e agricultura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, n. 9, p. 82-89. 2010.

JANK, M. S.; RODRIGUES, L. Dinâmica e agenda do setor sucroalcooleiro na próxima década. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n.4, p.86-96, out/dez 2007.

LENDERINK, G. et al. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

MACHADO, M. Os limites do preço do petróleo. **Desafios do Desenvolvimento**, v. 87, p. 44 – 51, Ano 13, 2016. Disponível em: <[http://desafios.ipea.gov.br/images/stories/ed87/pdfs/160616\\_revista\\_desafios\\_87.pdf](http://desafios.ipea.gov.br/images/stories/ed87/pdfs/160616_revista_desafios_87.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2019.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2009.

MME, Ministério de Minas Energia e Energia. Lançamento do RenovaBio 2030. **Boletim Mensal dos Biocombustíveis**, Brasília, n. 104, out. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

MARCOLINI, M. de P. **Efeito das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático para cultura de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) no estado do Tocantins**. 2014. 100f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, UFT, Palmas, 2014.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; BARBARISI, B. F.; PILAU, F. G.; PACHECO, L. R. F.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA15., 2007. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBA, 2007.

MÁRTIL, I. La historia del precio del petróleo: subidos a una montaña rusa. **Público**, EconoNuestra, 13 feb. 2016. Disponível em: <<https://blogs.pUBLICO.es/econonuestra/2016/02/13/la-historia-del-precio-del-petroleo-subidos-a-una-montana-rusa/>>. Acesso em: 12 jan. 2020.

MINGUEZ, M. I.; RUIZ-RAMOS, M.; DÍAZ-AMBRONA, C. H.; QUEMADA, M. Productivity in agricultural systems under climate change scenarios: evaluation and adaptation. **Journal de Physique**, Paris, v.4, n. 121, p.269-281, 2004.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Trends in atmospheric carbon dioxide**: monthly average Mauna Loa CO<sub>2</sub>. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 30 jul. 2021.

NAVES-BARBIERO, C. C. **Efeito das mudanças climáticas sobre o zoneamento agroclimático da *Hevea brasiliensis* no estado do Tocantins**. 2014. 108 f. Tese (Doutorado em Biologia e Ecologia das Alterações Globais). Universidade de Aveiro - UA. Aveiro. Portugal. 2014.

UNFCCC. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima. Conferência das Partes – COP 21. **Adoção do Acordo Paris**. Paris: UNFCCC. 12 dez. 2015. 42 p. Disponível em: <<https://unfccc.int/documents/9064>>. Acesso em: 31 jul. 2020.

OLIVEIRA FILHO, A. A. de; CONSONI, F. L. Reestruturação do setor sucroalcooleiro brasileiro na transição para o etanol de segunda geração. In: XVI CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE GESTÃO DA TECNOLOGIA – ALTEC 2015. **Anais...** Porto Alegre: ALTEC, 2015. p. 1 - 20. Disponível em: <<http://altec2015.nitec.co/altec/papers/676.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, 101 - 121, 2015.

OLIVEIRA, M. N. Produção agropecuária agregada: uma aplicação para o estado do Tocantins. **Revista Desafios**, Palmas, v. 05, n. 01, p. 135-147, 2018.

PEREIRA, A. R. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n.2, p.311-313, 2005.

RANIERI, S. B. L.; BARRETO; A. G. O. P.; KLUG, I. L. F. Potencial de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar para o estado do Maranhão. In: Pólo Nacional de Biocombustíveis. **Estudo comparativo do potencial de produção de etanol no Maranhão: vantagens competitivas e comparativas**. Piracicaba: ESALQ, 2007. cap.1, p. 1-69.

RODRIGUES FILHO, S.; JULIANI, A. J. Sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 78, p. 195 – 212. 2013.

ROLDÃO, A. de F.; FERREIRA, V. de O. Climatologia do estado do Tocantins – Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1161 – 1181. 2019

ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e seguridade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n.3, p. 386 - 399, 2001.

SALATI, E.; SALATI, E.; CAMPANHOL, T.; VILLA NOVA, N. **Tendências das variações climáticas para o Brasil no século XX e balanços hídricos para cenários climáticos para o século XXI**: relatório 4. Rio de Janeiro: MMA, 2007. 182 p.

SANTIAGO, G. A. C. F. **Impactos de cenários climáticos futuros na aptidão agroclimática da cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Pernambuco - UFPE. Recife. 2015.

THORTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Thechnology, 1955. 104 p.

UNICA; CEISE. **Setor sucroenergético no Brasil: uma visão para 2030**. São Paulo: UNICA/CEISE. 2016, 8p. Disponível em: <[www.mme.gov.br-documents](http://www.mme.gov.br-documents)>. Acesso em: 14 jan. 2020.

VIANNA, M. S; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, abr. 2014.

VICTORIA, D. de C.; SANTIAGO, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; PEREIRA, A. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Water balance for the Ji-Paraná river basin, western Amazon, using a simple method through geographical information systems and remote sensing. **Earth Interactions**, Madison, v. 11, n. 5, p. 1-21, 2007.

ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Alterações devem deslocar culturas agrícolas. **Scientific American Brasil**, São Paulo, n. 74, p. 72-77, jul. 2008.

WALDHEIM, P. V.; CARVALHO, V. S. B.; CORREA, E.; FRANÇA, J. R. de A. Zoneamento climático da cana-de-açúcar, da laranja e do algodão herbáceo para a região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 28-41, 2006.